

基于四元船舶领域和避碰规则的碰撞危险度模型

江 行^{1,2}, 贾志霁^{1,2}, 郑海涛^{1,2}

(1. 大连海事大学 航海学院, 辽宁大连 116026; 2. 辽宁省航海安全保障重点实验室, 辽宁大连 116026)

摘 要: 目前, 船舶碰撞危险度的评价多基于各类船舶领域模型, 缺乏对海上避碰规则这一因素的考虑。为此, 基于四元船舶领域和海上避碰规则对船舶碰撞危险度模糊评价模型进行了改进。模型在计算碰撞危险度时, 考虑了本船是否侵入目标船舶领域的这一情况, 并将本船作为直航船时的是否处于紧迫局面这一状况融入到了碰撞危险度评价中。使用 MATLAB 进行了仿真实验, 结果表明改进的模糊评价模型能计算出更符合海上实情且满足海上避碰规则的碰撞危险度, 为后续避碰决策研究提供更为准确的数据。

关键词: 碰撞危险度; 模糊四元船舶领域; 国际海上避碰规则; 模糊评价

中图分类号: U675.96 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbge.2020.S1.086

Collision Risk Model Based on Quaternion Ship Domain and Preventing Collisions Regulations

JIANG Xing^{1,2}, JIA Zhipei^{1,2}, ZHENG Haitao^{1,2}

(1. Navigation College, Dalian Maritime University, Liaoning Dalian 116026, China; 2. Key Laboratory of Navigation Safety Guarantee of Liaoning Province, Liaoning Dalian 116026, China)

Abstract: At present, the risk assessment of ship collision is mostly based on all kinds of ship domain models, and it lacks consideration of the International Regulations for Preventing Collisions at Sea (COLREGs). Therefore, based on fuzzy quaternion ship domain and COLREGs, the fuzzy evaluation model of collision risk is improved. When calculating the collision risk, the model takes into account whether the ship intrudes into the target ship domain, and whether the ship is in close-quarters situation when it is a stand-on vessel is incorporated into the collision risk evaluation. MATLAB is used to carry out simulation experiment. The result shows that the improved fuzzy evaluation model can give a collision risk degree much closer to the marine reality and meets COLREGs, which provides more accurate and stable data for decision-making.

Key words: collision risk; fuzzy quaternion ship domain; International Regulations for Preventing Collisions at Sea (COLREGs); fuzzy evaluation

0 引言

随着经济的快速发展, 贸易全球化的不断加快, 全球航运业获得了极大的发展, 船舶数量日益增长, 船舶大型化和快速化的进程不断加快。海上运输业日益繁荣, 交通密度逐渐增大, 海上交通事故发生率也逐年变多, 其中碰撞事故居多^[1]。随着科技的发展, 优化算法的进步, 船舶避碰决策的研究也越来越自动化和智能化, 其中船舶碰撞危险度是船舶避碰决策的

一个重要研究方向。从某方面可以说船舶碰撞危险度的研究对实现船舶自动避碰和减少碰撞事故的发生有重大意义。近年, 各国专家学者把船舶领域与船舶碰撞危险度相结合, 取得了不错的成果。但在研究过程中对他船船舶领域和海上避碰规则等因素考虑不全面, 本文主要针对以上问题进行研究。

严庆新^[2]在船舶几何原理的基础上使用模糊评价的方法, 建立了碰撞危险度模型, 但该模型只考虑了

收稿日期: 2020-05-25; 修回日期: 2020-07-01

作者简介: 江 行 (1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 船舶智能避碰。

几何参数, 未考虑其他因素适用性较差。陈建华等^[3]和路泽永等^[4]将神经网络和模糊推理加入到碰撞危险度计算中, 此方法有极高的自适应性, 但与海上避碰规则结合较少。郑忠义等^[5-6]、LIU 等^[7]和 TSOU 等^[8-9]使用传统的空间与时间相结合的危险度评价方法, 计算过程中仅考虑最近会遇距离 (DCPA) 和最短会遇时间 (TPCA), 考虑影响因素不全面, 且对不同水域适用性较差。刘茹茹等^[10]在考虑 DCPA 与 TCPA 同时加入了船舶安全距离圈、最晚施舵时间等因素, 但其对最晚施舵时间的确定较为模糊, 人为主观性较强。章泽虎^[11]虽然在模型中考虑了人、船、环境等因素, 但在计算时对船舶种类、类型、船长做了限定, 导致其模型具有一定的局限性。刘冬冬等^[12]将四元船舶领域与模糊评价模型相结合, 并对他船侵入本船船舶领域的模型进行了一定的改进, 但其在改进时并未考虑本船侵入他船船舶领域的情况。

本文使用以 DCPA、TCPA、目标船的距离、方位、船速比 5 个影响因素作为基本的评判参数, 并在文献 [12] 基础上考虑本船是否侵入他船船舶领域改进 DCPA 隶属度函数, 并结合海上避碰规则, 当本船为直航船时判断目标船与本船是否为紧迫局面, 将其作为新参考因素改进碰撞危险度的计算公式, 以此建立改进的碰撞危险度模糊评价模型。

1 基本评判参数的计算

研究者为方便地判断船舶之间的碰撞危险, 从而加入了碰撞危险度的概念, 通过碰撞危险度来判断是否需要采取避让措施。常用的碰撞危险度模糊评价方法通常以 DCPA、TCPA、与目标船的距离、方位、船速比 5 个影响因素作为基本的评判参数。

因此, 需要通过 AIS 数据获得会遇局面时船舶的基本信息来计算这 5 个基本参数^[13]。以本船为原点平行于赤道向东为 x 轴正方向, 垂直于赤道向北为 y 轴正方向建立坐标系, 目标船的船位信息(x_T, y_T)、航速 v_T 、航向 φ_T ; 本船的船位信息(x_O, y_O)、航速 v_O 、航向 φ_O 。以本船为原点建立平面坐标系。分别计算本船与目标船的相对速度 v_R 、本船与目标船的相对航向 φ_O 、目标船与本船的距离 R 、目标船对本船的真方位 α_{TO} 、本船对目标船的真方位 α_{OT} 、DCPA (用 d_{CPA} 表示)、TCPA (用 t_{CPA} 表示)、目标船与本船船速比 K , 结果如下:

$$v_R = \sqrt{v_{OTx}^2 + v_{OTy}^2} \quad (1)$$

$$\varphi_R = \begin{cases} \arctan \frac{v_{OTx}}{v_{OTy}} + \theta \\ 90 & v_{OTx} \geq 0, v_{OTy} = 0 \\ 270 & v_{OTx} < 0, v_{OTy} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$R = \sqrt{(x_O - x_T)^2 + (y_O - y_T)^2} \quad (3)$$

$$\alpha_{TO} = \begin{cases} \arctan \frac{x_T - x_O}{y_T - y_O} + \gamma_T \\ 90 & x_T - x_O \geq 0, y_T - y_O = 0 \\ 270 & x_T - x_O < 0, y_T - y_O = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\alpha_{OT} = \begin{cases} \arctan \frac{x_O - x_T}{y_O - y_T} + \gamma_O \\ 90 & x_O - x_T \geq 0, y_O - y_T = 0 \\ 270 & x_O - x_T < 0, y_O - y_T = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$d_{CPA} = R \times \sin(\varphi_R - \varphi_{TO} - 180) \quad (6)$$

$$t_{CPA} = R \times \cos(\varphi_R - \varphi_{TO} - 180) / v_R \quad (7)$$

$$K = \frac{v_T}{v_O} \quad (8)$$

式中: $v_{OTx} = v_O \sin \varphi_O - v_T \sin \varphi_T$;

$$v_{OTy} = v_O \cos \varphi_O - v_T \cos \varphi_T$$

$$\theta = \begin{cases} 0, v_{OTx} \geq 0, v_{OTy} > 0 \\ 180, v_{OTx} < 0, v_{OTy} < 0 \\ 180, v_{OTx} \geq 0, v_{OTy} < 0 \\ 360, v_{OTx} < 0, v_{OTy} > 0 \end{cases}$$

$$\gamma_T = \begin{cases} 0, x_T - x_O \geq 0, y_T - y_O > 0 \\ 180, x_T - x_O < 0, y_T - y_O < 0 \\ 180, x_T - x_O \geq 0, y_T - y_O < 0 \\ 360, x_T - x_O < 0, y_T - y_O > 0 \end{cases}$$

$$\gamma_O = \begin{cases} 0, x_O - x_T \geq 0, y_O - y_T > 0 \\ 180, x_O - x_T < 0, y_O - y_T < 0 \\ 180, x_O - x_T \geq 0, y_O - y_T < 0 \\ 360, x_O - x_T < 0, y_O - y_T > 0 \end{cases}^{\circ}$$

2 四元船舶领域模型

往常对于船舶危险度的研究一般是使用建立在特定水域的圆形或椭圆形船舶领域, 但使用这些针对特定水域的船舶领域模型来计算一般情况下的船舶危险度时存在着些许误差。针对上述问题我国学者王宁基于统一解析框架使用智能技术提出了一个综合考虑各种影响因素的模糊四元船舶领域模型^[14]。该模型可以通过调节参数 k 改变领域形状以适用于各种水域状况, 为方便计算, 本文将以 k 为 2 时 (船舶领域由 4 个每两个方向半径所确定椭圆, 取其 1/4 组成不规则椭圆形, 见图 1) 进行危险度判断。图 1 中, 以船为原点, 船首向为 x 轴正方向, 垂直于船首向右方向为 y 轴正方向建立坐标系, R_{fore} 、 R_{aft} 为四元船舶领域纵向前、后半径, R_{port} 、 R_{starb} 为四元船舶领域横向左、右半径, 其计算式为

$$\begin{cases} R_{\text{fore}} = (1 + 1.34\sqrt{k_{\text{AD}}^2 + (k_{\text{DT}}/2)^2})L \\ R_{\text{aft}} = (1 + 0.67\sqrt{k_{\text{AD}}^2 + (k_{\text{DT}}/2)^2})L \\ R_{\text{starb}} = (0.2 + k_{\text{DT}})L \\ R_{\text{port}} = (0.2 + 0.75k_{\text{DT}})L \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} k_{\text{AD}} = 10^{0.3591\lg v + 0.0952} \\ k_{\text{DT}} = 10^{0.5441\lg v - 0.0795} \end{cases} \quad (10)$$

式中: L 为本船船长; v 为本船船舶速度; k_{AD} 为旋回初径的系数; k_{DT} 为船舶进距的系数。

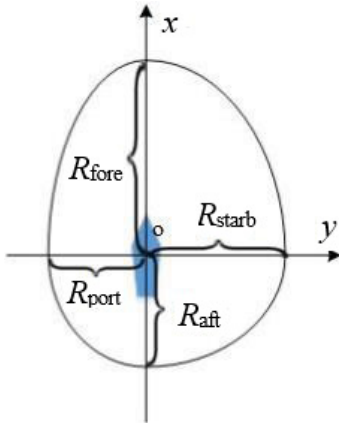


图1 四元船舶领域示意图

$$r_1 = \begin{cases} \sqrt{R_{\text{fore}}^2 R_{\text{starb}}^2 / (R_{\text{fore}}^2 \sin^2 \alpha_1 + R_{\text{starb}}^2 \cos^2 \alpha_1)} & y > 0, x \geq 0 \\ \sqrt{R_{\text{starb}}^2 R_{\text{aft}}^2 / (R_{\text{starb}}^2 \sin^2 \alpha_2 + R_{\text{aft}}^2 \cos^2 \alpha_2)} & y \geq 0, x < 0 \\ \sqrt{R_{\text{port}}^2 R_{\text{aft}}^2 / (R_{\text{port}}^2 \sin^2 \alpha_3 + R_{\text{aft}}^2 \cos^2 \alpha_3)} & y < 0, x \geq 0 \\ \sqrt{R_{\text{fore}}^2 R_{\text{port}}^2 / (R_{\text{fore}}^2 \sin^2 \alpha_4 + R_{\text{port}}^2 \cos^2 \alpha_4)} & y \geq 0, x < 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中: (y, x) 为最近会遇点在四元船舶领域所建立坐标系中的坐标; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 分别为本船到最近会遇点的连线与 $R_{\text{fore}}, R_{\text{starb}}, R_{\text{port}}, R_{\text{aft}}$ 的夹角。

4 改进的船舶碰撞危险度模糊评价模型

在船舶会遇时, 本船与目标船是否有碰撞危险难以界定, 因此引入碰撞危险度来判断是否有碰撞危险。而常用的通过模糊数学评价来判断碰撞危险度的模型, 仅考虑了 DCPA 的大小, 文献[12]在此基础上考虑了当 $d_{\text{CPA}} > r_1$ 船舶领域被入侵的情况并加以改进, 但其并未考虑如图 2 所示的情况, 即当本船船舶领域未被侵入时, 却侵入了目标船船舶领域。

本文将对图 2 所示问题进行解决。以目标船为原点, 船首向为 y 轴正方向, 垂直于船首向向右方向为 x 轴正方向建立坐标系。使用第 1 节所得数据进行坐标转换, 转换后本船船位信息为:

领域边界方程^[14]为

$$f(x, y) = \left(\frac{2x}{(1 + \text{sng}x)R_{\text{fore}} - (1 - \text{sng}x)R_{\text{aft}}} \right)^2 + \left(\frac{2y}{(1 + \text{sng}y)R_{\text{starb}} - (1 - \text{sng}y)R_{\text{port}}} \right)^2 \quad (11)$$

$$\text{sng}x = \begin{cases} -1, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}$$

$$\text{sng}y = \begin{cases} -1, & y < 0 \\ 1, & y \geq 0 \end{cases}$$

3 最小安全会遇距离的确定

基于上述的四元船舶领域模型建立船舶领域, 此领域拒绝他船入侵, 即领域内碰撞危险度为 1, 取领域边界为最小安全会遇距离 r_1 , 取 2 倍 r_1 为船舶安全通过距离 r_2 (即当 DCPA 未进入 r_2 时, k_{DCPA} 为 0)。由第二小节对船舶领域的描述, 本文根据椭圆原点到边的距离 r 公式:

$$r = \sqrt{a^2 b^2 / (a^2 \sin^2 \alpha + b^2 \cos^2 \alpha)} \quad (12)$$

式中: a 为椭圆长半轴; b 为椭圆短半轴; α 为与长半轴 a 的夹角, $(^\circ)$ 。

推导出最小安全会遇距离 r_1 的计算公式:

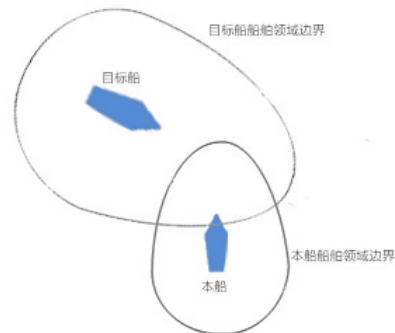


图2 本船领域未被侵入却侵入他船船舶领域

$$\begin{aligned} x_{01} &= R \sin \beta_0, y_{01} = R \cos \beta_0, \beta_0 = \alpha_{0T} - \varphi_T + \gamma_1, \\ \gamma_1 &= \begin{cases} 360, & \alpha_{0T} - \varphi_T \leq 0 \\ 0, & \alpha_{0T} - \varphi_T > 0 \end{cases} \end{aligned}$$

根据新的本船坐标 (x_{01}, y_{01}) 可得本船相对于目标船的相对运动线方程:

$$y = \cot(\varphi_R - \varphi_T)x + (y_{O1} - x_{O1}\cot(\varphi_R - \varphi_T)) \quad (14)$$

但前文所述目标船舶领域是以目标船为原点，船首向为 x 轴正方向，垂直于船首向向右方向为 y 轴正方向建立坐标系。需以此坐标系进行计算，所以本船相对于目标船的相对运动线方程为：

$$x = \cot(\varphi_R - \varphi_T)y + (y_{O1} - x_{O1}\cot(\varphi_R - \varphi_T)) \quad (15)$$

根据前文所述领域边界方程可得目标船舶领域边界方程：

$$f_{O1}(x, y) = \left(\frac{2x}{(1 + \text{sng}x)R_{\text{fore}} - (1 - \text{sng}x)R_{\text{aft}}} \right)^2 + \left(\frac{2y}{(1 + \text{sng}y)R_{\text{starb}} - (1 - \text{sng}y)R_{\text{port}}} \right)^2 \quad (16)$$

$$\text{sng}x = \begin{cases} -1, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}$$

$$\text{sng}y = \begin{cases} -1, & y < 0 \\ 1, & y \geq 0 \end{cases}$$

如图 3 所示，当船舶会侵入他船船舶领域时其相对运动线会与船舶领域边界产生交点，所以通过计算本船对目标船相对运动线与目标船舶领域边界方程的是否存在交点，可以判断本船是否会侵入目标船的船舶领域。

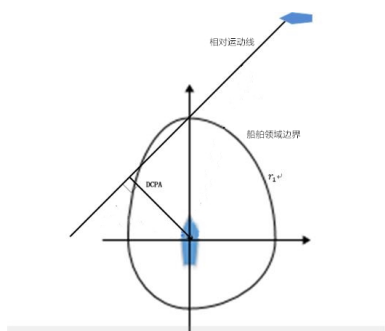


图 3 相对运动线侵入船舶领域边界示意图

同理，以本船为原点建立坐标系，通过坐标转换得到目标船相对于本船的相对运动线方程，可计算目标船与本船的相对运动线与本船船舶领域边界方程的是否存在交点，来判断目标船舶是否会侵入本船的船舶领域。

常用的模糊评价模型，以 DCPA、TCPA、船速比、目标船距离、方位为基础评估参数。分别计算出各参数危险隶属函数： $k_{d_{\text{CPA}}}$ 、 $k_{t_{\text{CPA}}}$ 、 k_k 、 k_ϕ 。本文对原有的模型进行改进，通过计算相对运动线与船舶领域边界方程的交点个数 u_1 、 u_2 是否为零（来保证本船在判断危险度和避碰时能判断本船是否会侵入目标船的船舶领域和目标船是否会侵入本船船舶领域。）对 DCPA 危险隶属函数进行改进。

$$k_{d_{\text{CPA}}} = \begin{cases} 1, & d_{\text{CPA}} < r_1 \parallel u_1 > 0 \parallel u_2 > 0 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin\left(\frac{180^\circ}{r_2 - r_1} \left(d_{\text{CPA}} - \frac{r_2 + r_1}{2}\right)\right), & r_1 < d_{\text{CPA}} < r_2 \\ 0, & d_{\text{CPA}} \geq r_2 \end{cases} \quad (17)$$

式中： u_1 、 u_2 分别为本船对目标船相对运动线与目标船舶领域边界方程的交点个数、目标船对本船相对运动线与本船船舶领域边界方程的交点个数。再使用文献[15]所提出的隶属度评估函数对 $k_{t_{\text{CPA}}}$ 、 k_R 、 k_ϕ 、 k_k 进行计算。

$$k_{t_{\text{CPA}}} = \begin{cases} 1, & t_{\text{CPA}} \leq T_1 \\ \left(\frac{T_2 - t_{\text{CPA}}}{T_2 - T_1}\right)^2, & T_1 < t_{\text{CPA}} \leq T_2 \\ 0, & t_{\text{CPA}} > T_2, \quad d_{\text{CPA}} > d_4 \end{cases} \quad (18)$$

$$k_R = \begin{cases} 1, & 0 \leq R \leq d_3 \\ \left(\frac{d_4 - R}{d_4 - d_3}\right)^2, & d_3 < R \leq d_4 \\ 0, & R > d_4 \end{cases} \quad (19)$$

$$k_\phi = \frac{1}{2} \left[\cos(\alpha_{\text{TO}} - 19^\circ) + \sqrt{\frac{440}{289} + \cos^2(\alpha_{\text{TO}} - 19^\circ)} \right] - \frac{5}{17} \quad (20)$$

$$k_K = \frac{1}{1 + \frac{M}{K\sqrt{K^2 + 1 + 2K\sin C}}} \quad (21)$$

($K \geq 0$, $M = 2$, $C \in [0, \pi]$)

式中：

$$T_1 = \begin{cases} \frac{\sqrt{d_3^2 - d_{\text{CPA}}^2}}{v_R}, & d_{\text{CPA}} \leq d_3 \\ \frac{d_{\text{CPA}} - d_3}{v_R}, & d_{\text{CPA}} > d_3 \end{cases},$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{d_4^2 - d_{\text{CPA}}^2}}{v_R}, \quad d_{\text{CPA}} \leq d_4,$$

$$d_3 = K_1 K_2 K_3 D_{\min},$$

$$d_4 = K_1 K_2 K_3 r_2.$$

其中， r_2 为船舶安全通过距离， K_1 、 K_2 、 K_3 为人因素，为方便研究，默认驾驶员技术水平较好，3 个因素都为 1； D_{\min} 为在最晚施舵点时的两船距离，根据统计一般为本船 12 倍船长； C 为两船碰角。

常用的碰撞危险度模糊评价模型只是单纯计算碰撞危险度，少有考虑海上避碰规则。本文根据避碰规则的规定将对遇、会遇、追越时直航、让路和紧迫局面的判断加入到碰撞危险度的计算当中：

本船与目标船会遇角 F ：

$$F = \varphi_T - \varphi_O - 180^\circ + p \quad (22)$$

$$p = \begin{cases} 0^\circ, (\varphi_T - \varphi_O - 180^\circ) \geq 0 \\ 360^\circ, (\varphi_T - \varphi_O - 180^\circ) < 0 \end{cases} \quad (23)$$

如图 4 所示, 对 3 种会遇局面划分界限:

1) 对遇局面: $0^\circ \leq F \leq 5^\circ$ 或 $355^\circ \leq F < 360^\circ$, 此时本船与目标船均为应采取避碰措施的船, 正常计算碰撞危险度。

2) 交叉相遇局面 A: $5^\circ < F \leq 112.5^\circ$, 此时本船为让路船, 目标船为直航船, 正常计算碰撞危险度。

3) 追越局面: $112.5^\circ < F < 247.5^\circ$, 此时本船为直航船, 目标船为让路船, 可以认为目标船的碰撞危险度为 0, 但根据文献[16]所规定有构成碰撞危险的两船已经接近到单凭一船已难以避免碰撞的局面称为紧迫局面, 所以本文认为当 $k_{d_{CPA}} \in [0, 1]$ 时两船构成碰撞危险, 当 $k_{t_{CPA}} \in [0, 1]$ 时两船已经近到一船采取措施已经难以避免碰撞, 当 $k_{d_{CPA}} \in [0, 1]$ 且 $k_{t_{CPA}} \in [0, 1]$ 时认为是紧迫局面, 此时本船需采取避让措施, 应正常计算碰撞危险度。

4) 交叉相遇局面 B: $247.5^\circ \leq F < 355^\circ$, 此时本船为直航船, 目标船为让路船, 可以认为目标船的碰撞危险度为 0, 但当 $k_{d_{CPA}} \in [0, 1]$ 且 $k_{t_{CPA}} \in [0, 1]$ 时认为是紧迫局面, 此时本船需采取紧急避让, 应正常计算碰撞危险度。

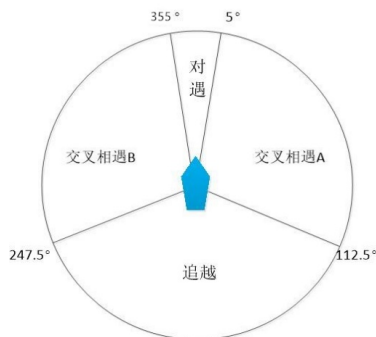


图 4 会遇局面示意图

考虑会遇与紧迫局面改进文献[15]的碰撞危险度计算模型:

$$s = a_{d_{CPA}} a_{t_{CPA}} a_R a_\phi a_K \begin{pmatrix} k_{d_{CPA}} \\ k_{t_{CPA}} \\ k_R \\ k_\phi \\ k_K \end{pmatrix} q \quad (24)$$

$$q = \begin{cases} 1, 247.5^\circ \leq F < 355^\circ (\delta k_{d_{CPA}} \in (0, 1], \delta k_{t_{CPA}} \in (0, 1]) \\ 0, 247.5^\circ \leq F < 355^\circ (k_{d_{CPA}} \notin (0, 1] \parallel k_{t_{CPA}} \notin (0, 1]) \\ 1, 112.5^\circ < F < 247.5^\circ (k_{d_{CPA}} \in (0, 1], k_{t_{CPA}} \in (0, 1]) \\ 0, 112.5^\circ < F < 247.5^\circ (k_{d_{CPA}} \notin (0, 1] \parallel k_{t_{CPA}} \notin (0, 1]) \\ 1, 0^\circ \leq F \leq 5^\circ \parallel 355^\circ \leq F < 360^\circ \parallel 5^\circ < F \leq 112.5^\circ \end{cases} \quad (24)$$

式中: F 为会遇角, $a_{d_{CPA}}$ 、 $a_{t_{CPA}}$ 、 a_R 、 a_ϕ 、 a_K 分别为 0.36、0.32、0.14、0.10 和 0.08。

5 模拟计算

船舶参数见表 1, 计算结果见表 2。

表 1 船舶参数表

船型	船长/m	航向/(°)	航速/kn	船位坐标
本船	150	0	15	10°23'14.43"N 113°48'14.90"E
目标船 A	280	220	15	10°28'07.33"N 113°48'44.76"E
目标船 B	140	130	15	10°27'51.18"N 113°46'33.54"E
目标船 C	140	240	15	10°27'53.16"N 113°49'50.60"E

表 2 计算结果对比表

项目	目标船 A	目标船 B	目标船 C
距离/n mile	4.89	4.89	4.89
DCPA/n mile	1.155	0.482	0.903
TCPA/min	10.1	10.7	11.1
会遇局面	交叉相遇局面 A	交叉相遇局面 B	交叉相遇局面 A
船舶领域是否会被入侵	是	是	否
未考虑侵入船舶领域的 $k_{d_{CPA}}$	0.251	1	0.853
考虑侵入船舶领域的 $k_{d_{CPA}}$	1	1	0.853
$k_{t_{CPA}}$	0	0	0
是否为紧迫局面	否	否	否
改进前的碰撞危险度 S	0.223	0.482	0.443 4
改进后碰撞危险度 S	0.493	0	0.443 4

由表 2 可以看出, 使用未改进的碰撞危险度评价模型 (即使用未考虑侵入船舶领域的 $k_{d_{CPA}}$), 目标船 A、B、C 碰撞危险度分别为: 0.223、0.482、0.443 4, 会得出目标船 C 比目标船 A 对本船更危险和本船需对

目标船 B 采取避碰措施的结论。但由于本船会侵入 A 船船舶领域, 所以实际上 A 船比 C 船对本船更危险, 而且根据避碰规则 B 船对本船处于交叉相遇局面 B, 此时本船为直航船, B 船位让路船, 且并未进入本文所规定的紧迫局面, 本船无需对 B 船采取避碰措施, 所以未改进的模型并不符合实际情况, 而使用本文所改进的碰撞危险度评价模型 (即使用考虑侵入船舶领域的 $k_{d_{CPA}}$), 三船对本船都未形成本文所规定的紧迫局面, 改进后目标船 A、B、C 碰撞危险度分别为: 0.493、0、0.443 4, 可以得出 A 船碰撞危险度最高需要优先避碰且本船无需对 B 船进行采取避碰措施的结论, 所得结论更符合海上避碰实践, 说明本文所改进的模型对比未改进的模型是更加合理的。

6 结论

为使船舶碰撞危险度的计算更符合海上实际情况, 本文将船舶领域、海上避碰规则与碰撞危险度模糊评价模型相结合。把本船是否侵入他船船舶领域作为参考因素加入模型, 并结合海上避碰规则, 除考虑本船作为让路船时应计算碰撞危险度这一正常情况外, 同时对本船为直航船时目标船与本船是否为紧迫局面是否需要计算碰撞危险度进行了判断, 并将其作为新参考因素加入到计算中, 在保障碰撞危险度结果准确性的同时使其更符合海上实际情况, 给后续决策研究提供更为准确的数据, 并为后续决策的安全性提供了保障。

参考文献:

- [1] EDWARD T G. Maritime Accidents What Went Wrong[M]. Houston, TX, U.S.: Gulf Publishing, 1989.
- [2] 严庆新. 船舶碰撞危险度评判模型[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 26(2): 77-79.
- [3] 陈建华, 陈红卫, 刘科. 基于模糊神经网络的一种船舶

碰撞危险度计算方法[J]. 舰船科学技术, 2008, 30(2): 33-37.

- [4] 路泽永. 遗传神经网络算法在船舶碰撞危险度确定中的应用[J]. 舰船科学技术, 2016(2): 85-87.
- [5] 郑中义, 吴兆麟. 船舶碰撞危险度的新模型[J]. 大连海事大学学报, 2002, 28(2): 1-5.
- [6] 吴兆麟, 郑中义. 时间碰撞危险度及模型[J]. 大连海事大学学报, 2001, 27(2): 1-5.
- [7] LIU H D, ZHANG L Y, LIU S, et al. The Application Research Foraging Intelligent Algorithm in Ship Collision Avoidance[C]// Inter-national Conference on Mechatronics, Control and Electronic Engineering, Atlantis Press, 2014.
- [8] TSOU M-C. Multi-target Collision Avoidance Route Planning under an ECDIS Framework[J]. Ocean Engineering, 2016, 121: 268-278.
- [9] TSOU M-C, KAO S-L, SU C-M. Decision Support from Genetic Algorithms for Ship Collision Avoidance Route Planning Andalerts[J]. Journal of Navigation, 2010, 63: 167-182.
- [10] 刘茹茹, 胡勤友. 一种主观的船舶碰撞危险度评价模型[J]. 上海海事大学学报, 2012, 33(1): 41-44.
- [11] 章泽虎. 基于模糊综合评判的船舶碰撞危险度模型研究[D]. 辽宁大连: 大连海事大学, 2012.
- [12] 刘冬冬, 史国友, 李伟峰, 等. 基于最短避碰距离和碰撞危险度的避碰决策支持[J]. 上海海事大学学报, 2018(1): 13-18.
- [13] 任鹏. 基于船舶碰撞危险度的避碰决策研究[D]. 辽宁大连: 大连海事大学, 2015.
- [14] 王宁, 刘刚健, 董诺, 等. 一种模糊四元船舶安全领域模型及船舶避碰方法: 103204223[P]. 2013-07-17.
- [15] 周江华, 吴春杰. 船舶碰撞危险度模型的构建[J]. 宁波大学学报, 2004, 17(1): 1-5.
- [16] 司玉琢, 吴兆麟. 船舶碰撞法[M]. 辽宁大连: 大连海事大学出版社, 1995.

(上接第 74 页)

由图 10 可知, 针对喷射速度、应力分布和喷嘴喷射发散程度三个指标, 评价最高的区域位于出口半径 205 mm, 延伸段 150 mm~225 mm 区间附近。综上, 当喷嘴出口半径选定后, 增加一段长度合适的延伸段, 能提高喷嘴的整体性能指标。

4 结论

本文以耙吸挖泥船艏端喷嘴出口半径、延伸段长度、特征长度和管径为母型参数, 以出口喷射速度、喷嘴应力及发散程度为评价指标, 通过参数化函数拟合, 采用熵权法进行参数权重分析, 形成一套耙吸挖泥船艏端喷嘴结构设计优化方法。

1) 基于喷射发散程度、应力分布、喷射速度指标的几何参数化模型能很好的诠释喷射特性。

2) 采用熵权法可针对不同作业条件下的优化目标, 建立综合评价函数, 实现目标优化。

参考文献:

- [1] 赵红香. 粒子冲击钻井破岩规律研究[D]. 山东青岛: 中国石油大学(华东), 2010.
- [2] 程志东. 浅谈耙吸挖泥船施工工艺[J]. 中国水运(下半月), 2012, 12(7): 142-143.
- [3] 王丽华, 韩政, 王费新. 耙吸挖泥船艏端喷射距计算及泥浆运动轨迹分析[J]. 水运工程, 2017(4): 15-19, 27.
- [4] 尹纪富, 王费新, 王丽华, 等. 耙吸挖泥船艏端喷射曲线及流场特性的数值模拟[J]. 水运工程, 2016(11): 29-33.